第3章

開発課題が目白押し，人と接するロボットのセンサ

独自仕様のセンサ開発，センサ同士を結ぶネットワークの開発，センサによる新たな動作の創造などテーマが尽きない

向井利春，中島弘道，加藤 陽，大西正輝

自動車に搭載されるセンサは年々増え続けている．自動車業界がより高い安全性や快適さを追求しているからである．ロボットも人と接することを考えると，自動車と同じように高い安全性と快適さを追求することになる．つまり，ロボットに搭載されるセンサは増える一方である．すると，センサ情報を効率良く収集するしくみや，センサを効率良く駆動するしくみが必要になってくる．さらに，ロボットにおいては，目的とする動作を，実行と結果解析という試行錯誤を繰り返すことで，学習しながら創造することも期待される．（編集部）

ロボットというと皆さんは何を思い浮かべるでしょうか．人によって，何がロボットかという概念はさまざまでしょう．人間型で人間のように動くものをロボットと考える人もいるし，人間型でなくても，状況に応じて自律的に行動できる機械をロボットと呼ぶ人もいます．ここでは，センサとアクチュエータを備え，センサ情報を処理してアクチュエータの動きに反映できる機械をロボットとします（図1）．

図1　ロボットとは
センサ情報を処理しアクチュエータの動きに反映させられる機械をロボットと考える．

つまり，ロボットの行動はセンサからの情報で決まるのであり，ロボットがいろいろな種類のセンサを数多く備えることで，ロボットの行動に多様性が生まれます．ロボットが，あらかじめ決められたプログラムや操縦者の指示どおりではなく，自分で判断して動くことを特に強調する場合には，自律型ロボットと呼びます．ロボットの行動がこのような多様性を持つことは，最終的にはいかに知的な行動を取れるかにつながっていきます．

日本は，産業機器向けロボットの生産台数および保有台数で世界一を誇るロボット大国です．しかし，産業機器向けロボットの市場規模は飽和しています．最近では，少子高齢化する社会からの要請もあり，人間と共存するロボットが期待されています．家庭や病院などの人間社会で活躍するロボットにとって，センサは産業機器向けロボット以上に欠かせない要素です．

産業機器向けロボットは，工場などで働くために設計され，完全に制御された環境で動けばよいものでした．しかし，人間社会で働くロボットには高度な環境認識能力が必要になります．例えば，家庭で動き回るロボットを考えると，日々，位置の変わるいすやテーブルなどの物体を避けなければなりません．また，床に物が置かれていたり，人が動き回ったりします（図2）．このような「乱雑」な環境で働くために，人間と共存するロボットには，多種多様なセンサを用いて環境の情報を取得して，環境に応じた行動を

KeyWord　没入型動力学シミュレーション，ガス・センサ，動的非線形応答，TGS-2400，きゅう覚センサ，dsPIC30F6012A，触覚センサ，C-CHIP，PNC-3200，人工ニューラルネット

3

とる必要があります．

以上のようにロボット，特に人間と共存するロボットには，たくさんのセンサが必要になります．また同時に，多様な動きを作り出すために，多くのモータも搭載する必要があります．外から見て，ロボットがちぐはぐではなく，きちんと統一された行動をとるためには，膨大なセンサ情報取得とモータの制御を，リアルタイムに統合できるシステムを構築する必要があります．

本稿では，筆者らが所属する理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターの開発した人間と共存するロボット「RI-MAN」を例に，センサとその情報処理について説明します．

1．ロボットのセンサに求められる条件

センサをロボットの感覚器官として用いる場合には，計測装置として用いる場合と比べ，新たな状況とそれに伴う課題が生じます．以下に，ロボットのセンサに必要とされる能力を列挙します．

① 小型，軽量

小型，軽量である必要性は言うまでもないでしょう．ロボットのボディの大きさや可搬重量は限られており，その中にドライバや処理回路まで含めて多数のセンサを収める必要があります．

② 省電力

ロボットはケーブルでつながれずに動き回れることが望ましいため，バッテリで駆動することになります．その場合，駆動時間を長くするために省電力である必要があります．

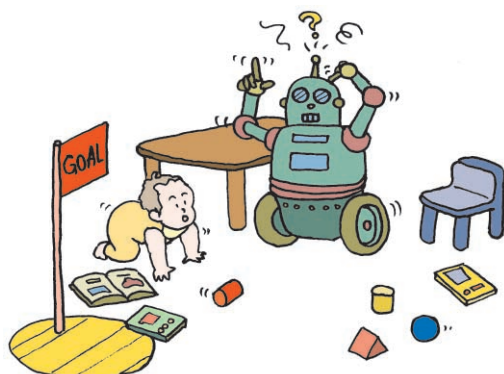



図2　ロボットにとって家庭は難しい環境
人間のいる環境は，ロボットにとっては乱雑で難しい環境．

③ リアルタイム性（実時間性）

リアルタイム性とは，ロボットの動きや環境の変化に追従できる十分な速さで，センサからも情報が得られることです．センシング量や制御対象が変われば，求められる速さも異なります．例えば，センサ・フィードバックによりロボット・アームの制御を行う場合には，アームの固有振動数の10倍程度のサンプリング周波数が，一つの目安と言われています．アームが小型軽量になれば，必要なサンプリング速度も上がります．

④ アクチュエータとの組み合わせによる能力拡大

ロボットはアクチュエータを持っています．そこで，アクチュエータを使ってセンサの状態を積極的に変えることで，センシングの能力を拡大できます．このような考え方をアクティブ・センシングと言い，ロボットのセンサならば，当然利用すべき方法です．

⑤ 目的に沿ったセンシング（必要十分な情報を得る）

ロボットのセンサは単なる計測ではなく，ある目的を達するためにあります．それ以上の能力があっても邪魔なだけなので，目的達成に必要十分な能力を見極めることが大切です．

⑥ 実環境のノイズに対する耐性

人間と共存するロボットが活動する環境は，工場のようにコントロールされておらず，予期していない光，音，温度などの状態に対処しなければなりません．

このようにコントロールされていない状況を「実環境」と呼びます．実環境下における不要で予期できない信号は，センサにとってはノイズとなりますが，ロボットのセンサはこのようなノイズが存在する環境でも使える必要があります．

● 生物の感覚情報処理はとても参考になる

ロボットのセンサには多くの能力が求められますが，生物の感覚器官はこのような能力を持っています．そこで，生物の感覚情報処理は，ロボットのセンサ系を構築する際にとても参考になります．

具体的には，生物はそれぞれの感覚の性質に応じた並列分散的な処理，局所的なフィードバック，感覚や運動の関係性の学習，抽象化した情報の統合などを行い，全体として効率的なシステムを構成しています．筆者らはこれらを

参考にしながら，ロボットのセンサの開発を行っています．

2．RI-MANに組み込まれているセンサ

筆者らの開発したロボットは，人と接して力仕事を行うことを目標としています．分かりやすいデモンストレーションとして，両腕で人を抱え上げることを目指しています．このロボットは病院や老人ホーム，さらには一般家庭で使うことを想定しているため，数多くのセンサを備えています．

● 介護ロボットに搭載するセンサ

具体的には，**写真1**にあるように，画像認識機能を備えた視覚，音源定位と音声認識機能を備えた聴覚，触覚センサ・フィードバックを行えるだけの精度やサンプリング速度を持つ触覚センサ，尿の検出が可能なきゅう覚センサ，移動時に障害物を検出するための超音波センサと赤外線センサを持っています．これらの中でも特徴的なのが，聴覚センサの音源定位，触覚センサ，きゅう覚センサです．

● 介護ロボットの目指す動作

まだすべてを実現できてはいませんが，RI-MANでは，センサを使って**図3**に示すような行動ができることを目指しています．

① まず，音声やティーチング・ペンダント（ロボットへの教示に使うリモコンのこと）による指示で，ある程度自律的に途中の障害物を避けながらベッドの横に移動します．
② 次に，操作者の指示により，ベッドで寝ている人をやさしく抱き上げ，車いすに移します．
③ 抱き上げたときにおむつがぬれていたら，操作者に通知します．そして，お風呂に連れて行きます．

①では，最初に操作者を見つけ指示を得るために，視覚と聴覚を使います．障害物を避けるためには視覚，超音波・赤外線センサが使えます．

②では，被介護者を落としたり痛みを与えたりしないように，触覚センサの出番です．

③では，きゅう覚センサが活躍します．

このように，人間が何気なく行う動作でも，実は多くの感覚情報が利用されており，ロボットに同じことをさせる場合には，同じ機能を持つセンサが必要となります．

以下では，RI-MANに特徴的なセンサや，センサ情報の動作への反映について説明します．

3．音源の方向を探す聴覚センサ

RI-MANでは，聴覚は操作者から音声コマンドを得るために使われています．音声を低ノイズで取得し，自然なコミュニケーションを実現するためには，RI-MANは操作者

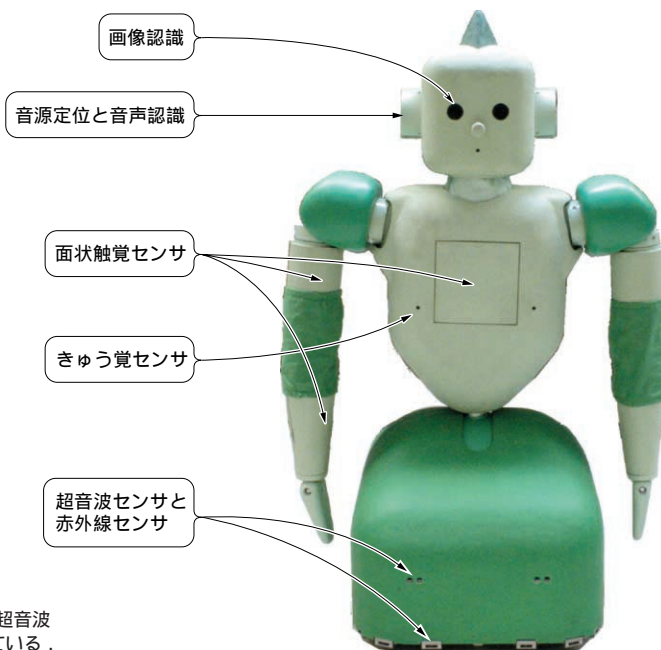



写真1
RI-MANの感覚機能
五感のうちの四感と近接センサ（超音波センサと赤外線センサ）が備わっている．

図3
RI-MANの目指しているデモ行動
このような行動を行うためには，多くのセンサを使いこなす必要がある．

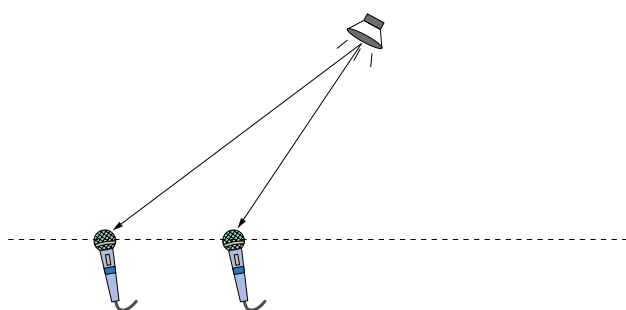
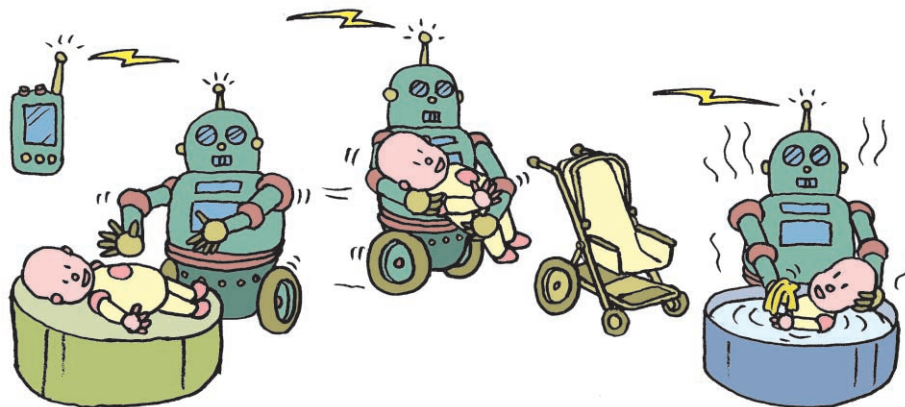



図4　音の到達時間差を利用すると音源が定位できる
音の到達時間差で，水平面内の音源の方向が求まる．ただし，前後で対称な位置にある音源の区別はできない．

を見つけて顔を向ける必要があります．これは，視覚による顔の検出と，聴覚による音源定位を組み合わせることにより行われます．音源定位を用いることにより，視野の外から呼ばれても，そちらに顔を向けて対応することが可能となります．

● 音の到達時間差を利用する

音源定位のための手がかりとして，まず考えられるのが，音源から複数あるマイクロホンに到達する音の到達時間差です（**図4**）．この仕組みを使うと，2本のマイクロホンがあれば，これらに対して水平方向の定位ができます．

しかし，前後で対称な位置にある音源の区別はできません．また，音源が水平面内ではなく，上下を含めた3次元的な分布をする場合にも定位はできません．

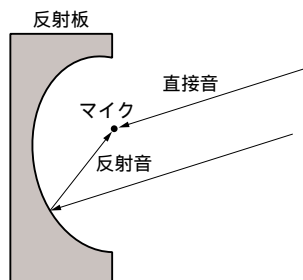
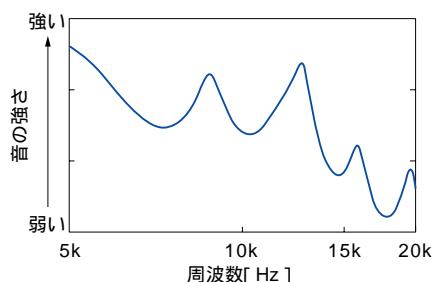
● 反射板を利用し水平・垂直方向の音源を定位する

これを解決する簡単な方法は，マイクロホンの本数を増やすことです．しかし，人間を含めて多くの動物は，二つの耳だけで上下左右や前後の音源定位を行っています．これは，耳についている外耳によって音のスペクトルが変化することを利用して実現していると考えられています．そこで，筆者らのロボットでも，外耳を模した反射板を備えた2本のマイクロホンだけで音源定位を行っています(1)．

● 音源を見つけるしくみ

音源から発してマイクロホンに到達する音には，音源からまっすぐ到達する直接音と，反射板で反射してから到達する反射音があります．この直接音と反射音が干渉することで，スペクトルに変化が生じます．直接音と反射音の位相がちょうど半波長分のときには，音波の山と谷が打ち消しあいます．音源のスペクトルが周波数軸上でフラットな値を持っていれば，マイクロホンで捉えた音の谷の位置を見ることによって，直接音と反射音の経路長差が分かります．

筆者らの製作した，上下左右の音に対応可能な音源定位システムを**写真2**に示します．左右の方向は音の到達時間差で分かります．反射板によるスペクトル変化は，上下方向の定位に使われます．反射板は**図5**に示すように，上下方向によって反射部とマイクロホンとの距離が異なる構造をしており，スペクトルの谷部分を見つけることで音源の上下方向が分かります．反射音の経路長が方向によって単調に変化すればよいので，反射板としてはいろいろな形が考えられます．筆者らは周波数を対数で取ったときの谷の位置が上下方向によって直線的に変化する形を採用してい

図5 反射板の形状
音源のスペクトルがフラットでも，マイクロホンで得られる音には反射板による干渉によって谷が生じる．

(a) 反射板で音の方向が変わる

(b) 反射板の周波数特性

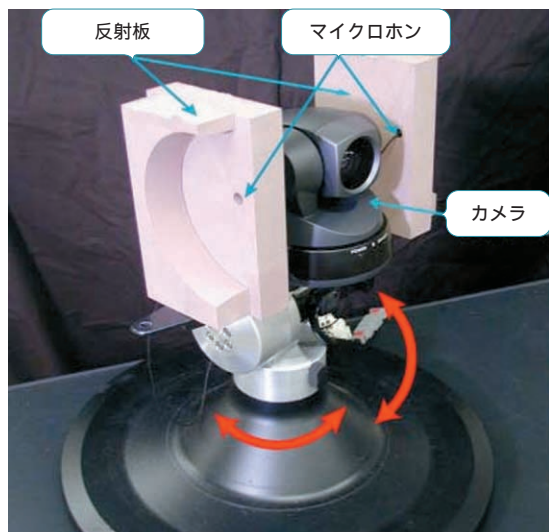



写真2 上下左右の音に対応可能な音源定位システム
音の到達時間差で水平方向が，スペクトル変化で上下方向が分かる．

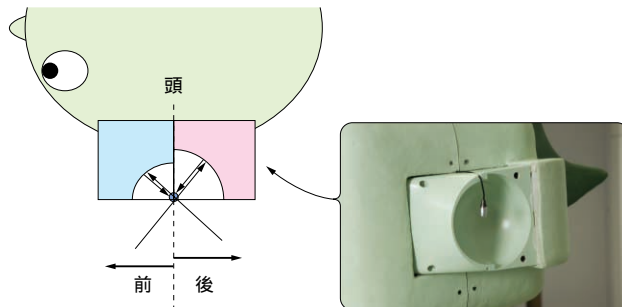



図6 前後方向が判別可能な反射板
前と後ろで半径の異なる反射板を作ることにより，スペクトル上の谷の位置から前後の判別が可能となる．

ます．また，図6のように前と後ろで反射音の経路長が異なる反射板を作れば，前後の判別ができます．これが，現在のRI-MANに装備されている形状です．

スペクトルがフラットに近い音源としては，コンピュータでホワイト・ノイズを作り出す場合や，インパルスに近い手たたきが挙げられます．通常の音源はスペクトルがフラットではありませんが，スペクトル上の深い谷を探したり，複数の谷を同時に見たりして総合的に判断することで，ある程度広い範囲の音源にも対応できます．

● 性能は実機で学習しながら高める

反射板は，理論的に求めた形をローランド製のモデリング・マシン「PNC-3200」で加工しています．実際には反射板の形は完全に設計どおりに作ることはできず，マイクロホンも理論どおり正確な位置にはセットできません．そのため，理論的に求めた音源位置とスペクトル上の谷の位置は完全には一致しないので，実際のロボットでは学習を行って対応しています．

実際の処理では，まず，音に時間の窓関数をかけてからFFT (fast Fourier transform) をかけることにより，ある時間の周波数スペクトルを得ます．次に，スペクトル上の谷の位置を見つけ出し，これから特徴ベクトルと呼ばれるものを作り出します．この特徴ベクトルと音源の方向の関係を，人工ニューラルネット(生物の神経系を工学的に模して，計算機シミュレーションや電子回路で実現したもの)により学習しています．

4. 人と柔らかく接するための触覚センサ

RI-MANは柔軟面状触覚センサを持ち，触覚センサからの情報を使って動きを制御できることが大きな特徴です．これを実現するために，センサ・フィードバックで使えるだけの性能を持つ触覚センサが必要となります．現在，商用の触覚センサとして，感圧導電性インクを用いたものなどいくつかが入手可能ですが，ロボットでの使用に必要な精度，サンプリング・レート，耐久性などを持つものがなかったため，自分たちで新たに触覚センサを開発しました[2]．

● センサの素子の選択

まず，感圧素子として何を使うかを決めました．センサ・フィードバックを行うには，センサの精度が大切です．筆者らは，ヒステリシスやドリフトをなるべく減らそうという観点から，半導体圧力センサを用いることにしました．半導体圧力センサの中から小型のものを探し，フジクラ製の小型圧力センサ素子「FPBS-04A」(**写真3**)を選択しました．これは直径5.8mmで，ダイアフラム部に抵抗ブリッジ(**図7**)があり，この抵抗値がダイアフラムにかかった圧力によって変化します．FPBS-04Aは本来，**図7**のように定電流源につないで用いますが，回路の簡単化のために定電圧源を用いました．

● センサの配線処理

このFPBS-04Aには，一つの素子につき標準的な方法では4本の配線が必要です．すると，8×8の感圧素子を持つ触覚センサを作る場合，単純に配線したのでは256本の配線が必要になるので，配線を減らす工夫が求められます．

触覚センサは本質的に接触を伴い，力による変形を受けるセンサですから，断線の可能性がなるべく小さくなるようにセンサ内部の配線を設計する必要もあります．

センサから出る配線は，関節をまたぐ場合にはロボットの内部の細い部分を通さなくてはならず，さらに関節は動くので断線しやすいため，できるだけ減らす必要があります．なお，感圧素子を並べて配線してから弾性体に埋め込むことで触覚センサとするわけですが，配線は埋め込む前に行う必要があります．

これらのことを考え，筆者らはフレキシブル基板(FPC；flexible printed circuit)上に感圧素子配置と配線をまとめて行う方法を選びました．回路は**図8**に示すように，縦と横をアナログ・スイッチで選ぶことにより，スキャンできるようにしました．また，最初の製作では，配線数を減らすため，ブリッジの片側(ハーフブリッジ)だけを使うようにしました．これを実現したのが**写真4**に示す触覚センサ・シートです．この回路では8×8の感圧素子がある場合，縦の選択のために16本，横の選択のために8本のケーブルを使います．アナログ・スイッチによる選択は，触覚センサ・シートの外部の回路で実現することとしました．

● 分散処理コントローラを使い，センサ・シートを駆動したり，情報を収集したりする

触覚センサ・シートのドライバとして，理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターで開発した，小型汎用分散コントローラ「C-CHIP」[(3)]を用いました(**写真5**，詳細は第2章を参照)．これに，アナログ・スイッチを実現するための追加の回路を組み合わせて，触覚センサのドライバとしました．触覚センサ・シートとの接続には24本のケーブルが必要です．

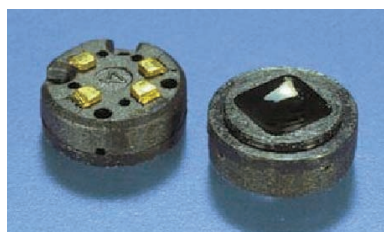



写真3　超小型圧力センサ素子「FPBS-04A」

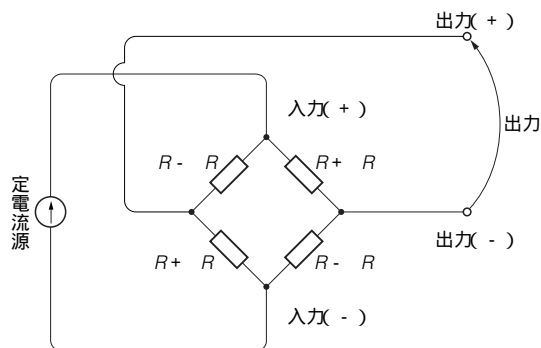



図7　圧力センサのダイアフラム上の抵抗ブリッジ
圧力が加わると，抵抗値が変化する．

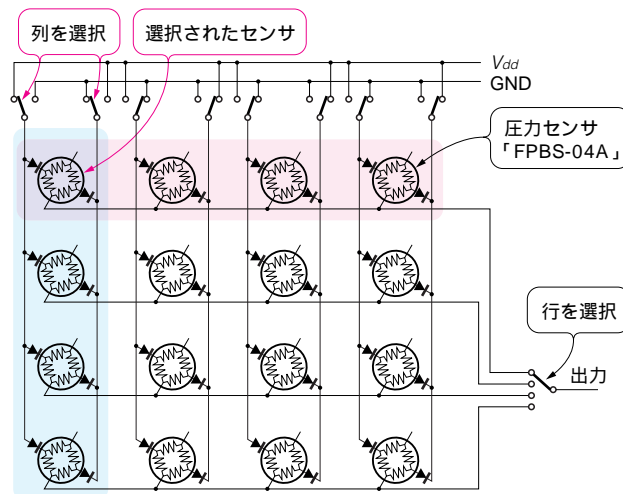



図8　触覚センサのスキャン用回路
4×4の感圧素子を持つ触覚センサの回路例．アナログ・スイッチで行と列を選ぶことにより，アレイ中の1素子の出力が得られる．

C-CHIPはRI-MANの中で複数台使われ，互いに通信しています．このネットワーク内では，ハードウェアによるシリアル通信によって，2ms以内で同期が取れることを保証されている共有メモリが構成されています．これにより触覚センサの情報は，ネットワーク内の他のC-CHIPやパソコンと共有されます．ただし，ネットワーク内で実現される共有メモリの大きさは512バイトと限られているため，一つの触覚センサが使える共有メモリの大きさは制限されます．共有メモリ内でそれぞれのノードが使える領域は，ステーションと呼ばれる8バイトが単位となっています．

筆者らの触覚センサ・ネットワークの実装では，ホスト・パソコン(RT-Linux使用)に1ステーション，各触覚センサに3ステーションずつ割り当てました．RI-MANには触覚センサが5枚実装されているのですが，ホスト・パソコンからは**図9**に示すように，それぞれのバイトで異なった触覚センサへの指示を与えるようにしました．1バイトだけでは指示が足りない場合があるので，共通アーギュメントという領域を設けました．

各触覚センサのドライバには感圧素子8×8個分の情報が読み込まれるわけですが，A-Dコンバータは12ビットなので各素子に2バイトずつ割り当てると，それだけで128バイト必要になってしまい，3ステーションの24バイトではとても足りません．そこで筆者らは，通常の処理では触覚センサ出力の幾何モーメントと呼ばれる量をC-CHIP内で計算し，その結果だけを共有メモリを使って通信することを選びました．0次，1次，2次の幾何モーメントは，

0次モーメント：$$M_0 = \sum_{x,y} I_{xy}$$

1次モーメント：$$M_x = \sum_{x,y} xI_{xy}, M_y = \sum_{x,y} yI_{xy}$$

2次モーメント：$$M_{xy} = \sum_{x,y} xyI_{xy}$$

$$M_{x^2-y^2} = \sum_{x,y} \left(x^2 - y^2\right) I_{xy}$$

と表されます．0次モーメントは出力の総和そのものです．また，1次モーメントを0次モーメントで割ることによって圧力中心が求まります．さらに，2次モーメントまで使うと**図10**のようにthe axis of least inertiaと呼ばれる，だ円で圧力分布を近似したときのだ円の長軸が求まります．感圧素子8×8個分の全情報が必要な場合には，1行ずつ，

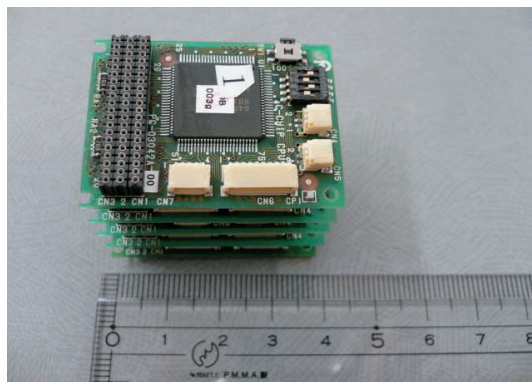



写真5　C-CHIPで作成した触覚センサ・ドライバ
小型汎用分散コントローラ「C-CHIP」に，アナログ・スイッチを並べた追加回路を組み合わせて，触覚センサ・ドライバとした．

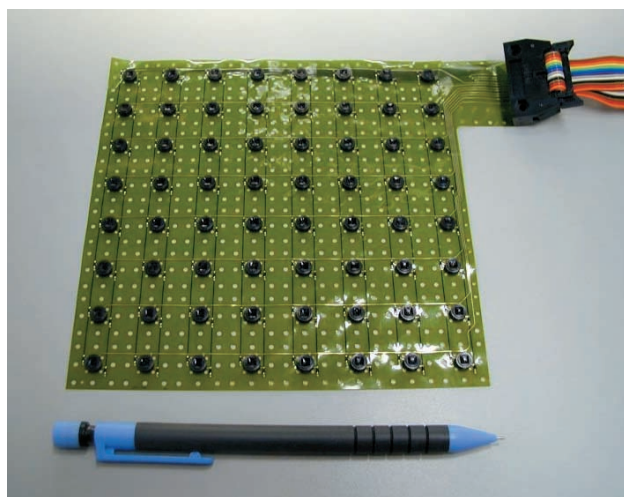



写真4　FPC上に実現した触覚センサ・シート

	機能	詳細
バイト0：	触覚センサ全体への指示	現在未使用
バイト1：	触覚センサ1への指示	*1
バイト2：	触覚センサ2への指示	*1
バイト3：	触覚センサ3への指示	*1
バイト4：	触覚センサ4への指示	*1
バイト5：	触覚センサ5への指示	*1
バイト6：	共通アーギュメント	
バイト7：	予備	

*1：b7 ～ b0（上位：コマンド，下位：アーギュメント）

図9　ホスト・パソコンからの触覚コマンド
コマンドに対するアーギュメントが4ビット以下のときには*1に示すようにコマンドと同一バイト内に書く．これを超えるときには，コマンドが発行されたときの共通アーギュメントの値を用いる．

時間をかけて通信することで対応しています．

C-CHIPで用いるプログラムはパソコン上でC言語で開発し，コンパイル後，C-CHIPのフラッシュ・メモリにダウンロードします．プログラムでは，基本的には`while`文でループを作り，アナログ・スイッチを切り替えてはA-Dコンバータから値を読み出すことを繰り返しています．モーメントの計算まで含めて1枚の触覚センサ・シートを処理するのにC-CHIPで約15msかかります．なお，1行ずつ全データを送る場合には約50msかかります．

● センサの感度を上げるための工夫

触覚シートを弾性体中に埋め込む構造にすることで，触覚センサが完成します．筆者らは，触覚センサ表面に加えた力が感圧素子の感圧部分に集中するように，**図11**に示すような構造を考えました．感圧素子のダイアフラム上に弾性体で作った突起を配置し，その上からスポンジ・シートで覆います．また，感圧素子間のギャップは紙粘土や石こうなどの塑性材で埋めることで，センサ表面から触ったときに凹凸を感じないようにしました．突起はスポンジ・シートより固めの弾性体のため，スポンジ・シートを突き上げる形になります．これにより，表面の圧力が感圧素子のダイアフラムに集中するようになります．実験から，この構造によって感度が2～3倍程度向上することが分かっています．

この触覚センサをロボットRI-MANに取り付けて，触覚を使ったRI-MANの動きを実現しました．触ったときに手を引く動作を**写真6**に示します．ロボットの制御ループは4msで回っています．触覚センサ出力が1ループ15msというのは，ぎりぎり我慢できる範囲ですが，より高速なほうが制御の能力を引き出せます．

● 感度向上と応答速度向上を目指し改良中

現在，触覚センサの感度向上とサンプリング・スピードの高速化を目指して，新たな触覚センサとドライバを作っています．まず，前回の触覚センサでは配線を減らすためにハーフブリッジを使ったのですが，新しいものでは，両側を使うフルブリッジとしました．これに伴う配線の増加を避けるため，触覚センサ・シート上にアナログ・スイッチを載せました．また，配線数を減らして感度を上げるために，計装アンプとディジタル・アンプも同時に載せました．

さらに，（2次元平面に展開できない）自由曲面にも張り付けられるように，FPC上の配線はくし状の部分に集中するようにしました．これにより，**写真7**のように，配線の

$(\bar{x}, \bar{y})$

θ

the axis of least inertia：

$$\theta = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(2(M_{xy} - M_0\bar{x}\bar{y}),\ (M_{x^2-y^2} - M_0(\bar{x}^2 - \bar{y}^2))\right)$$

図10　モーメントから傾きを計算
圧力分布を楕円で近似したときの傾きが，2次までの幾何モーメントから求まる．

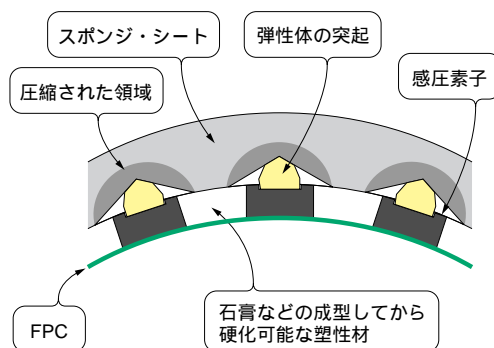



図11　RI-MANの触覚センサ
この構造により表面にかかった力が，感圧素子のダイアフラムに集中する．

（**a**）近付く

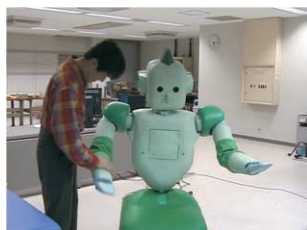
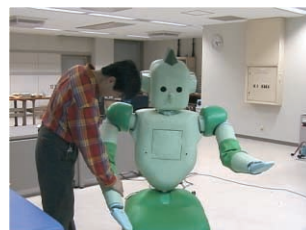
（**b**）センサに触れる

（**c**）腕を引く1

（**d**）腕を引く2

写真6　RI-MANの触覚センサによる反応
触覚センサを触ると，腕を引く動作をする．

ない部分を切り落として自由曲面にも張り付けることができるようになりました．

センサの駆動回路としては，高速性を目指して新たにdsPICボード（写真8）を使いました．これは，いろいろな計測や制御に使えることを目指して開発した汎用小型ボードです．CPUとして，米国Microchip Technology社の「dsPIC30F6012A」を用いています．このCPUは12ビットのA-Dコンバータを16チャネル持ち，DSPの演算機能も持ちます．これとパソコンとを1MbpsでUSB通信できるように，英国FTDI（Future Technology Devices International）社の「FT232RL」を載せ，dsPIC30F6012Aの多くのピンからの出力を引き出したコネクタを付け，35mm×50mmのサイズの基板としました．また，拡張基板をスタッキング・コネクタで接続できるようにしました．この基板により，触覚センサ・シート1枚を周期1msでサンプリングできるようになりました．さらに，RI-MANのネットワークに接続するための拡張ボードも製作しました．

センサ表面をこぶしでたたいたときの出力を図12に示します．たたいた際のインパクトが，1msのサンプリングであれば検出できていることが分かります．これは，従来の15msのサンプリングでは検出が難しい短時間の応答です．現在，ロボットRI-MANの触覚センサを，この新しいものに置き換えている最中です．

5. 尿を検出するきゅう覚センサ

きゅう覚センサは味覚センサと共に，化学的な状態（物質の種類や濃度，pHなど）に反応するセンサで，化学セン

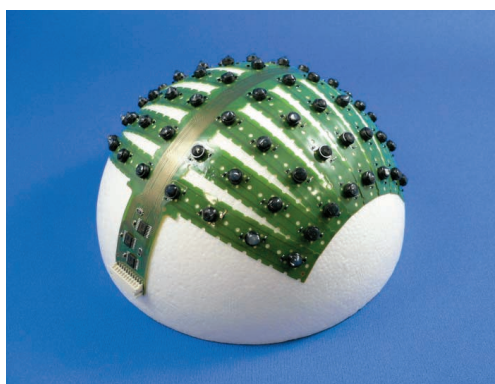



写真7　球面に貼り付けた新しい触覚センサ・シート
配線を集中させることにより，要らない部分を切り落とし，自由曲面にも貼り付けられるようになった．

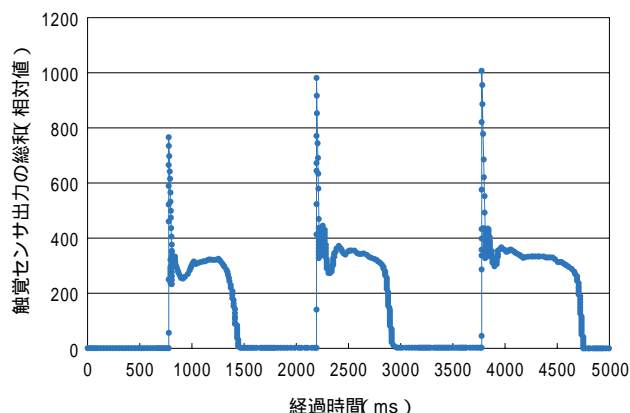



図12　こぶしで叩いたときの出力
新しく開発した触覚センサは1msでサンプリングできるため短時間のインパクトも検出できる．

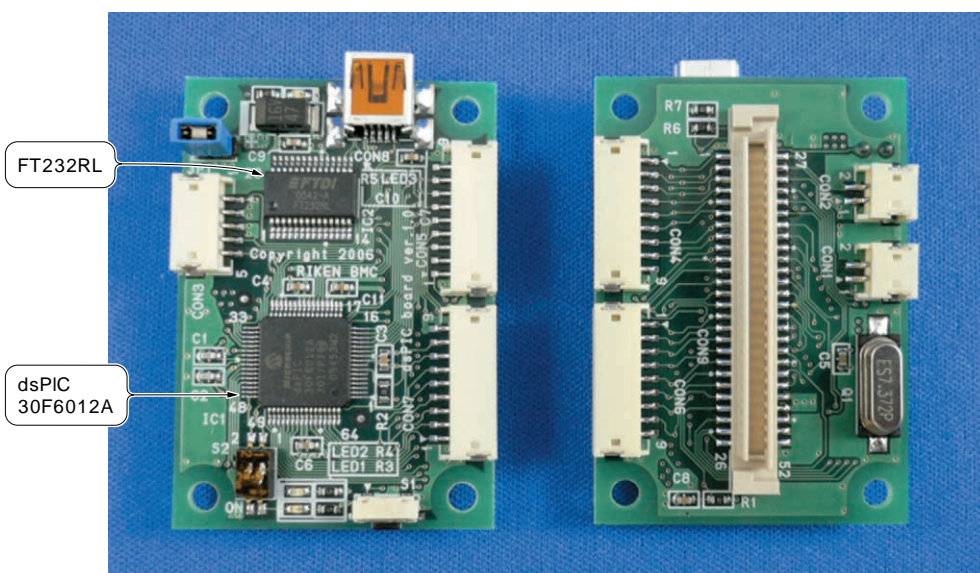



写真8
dsPICボード
CPUであるdsPIC30F6012Aのほとんどのi/O端子とコネクタで接続可能なボードを開発した．パソコンと通信するためのUSBインタフェースも備えている．本ボードは近日中にランドマークから商品化予定（http://www.landmarkinc.co.jp/）．

サと呼ばれています．これらをロボットに装備することは珍しいですが，生物を見てみると，視覚や聴覚が発達する前の単純な生物でも化学センサ的な要素を備えており，より根源的な感覚と考えることもできます．

● 半導体ガス・センサを利用する

人間にとっては，環境の快適性を測るのにきゅう覚が重要なので，今後の人間と共存するロボットでは，きゅう覚センサがより注目されると考えています．

RI-MANには**写真1**のように，きゅう覚センサが胴体の下の部分に取り付けられています．使用目的は，介護の際に被介護者の失禁を検出することです．また，将来的にはきゅう覚センサに人間が呼気をはきかけることで，病気の診断ができるようになる可能性もあります．

RI-MANに使われているきゅう覚センサは，フィガロ技研製の「TGS-2400」と呼ばれる半導体ガス・センサで，基本的には家庭の台所にあるガス漏れ警報機で使われているセンサと同じものです．ガスがセンサの感ガス部に来ると，反応して感ガス部の抵抗値が変化します．これによりガスが検出できるのです．

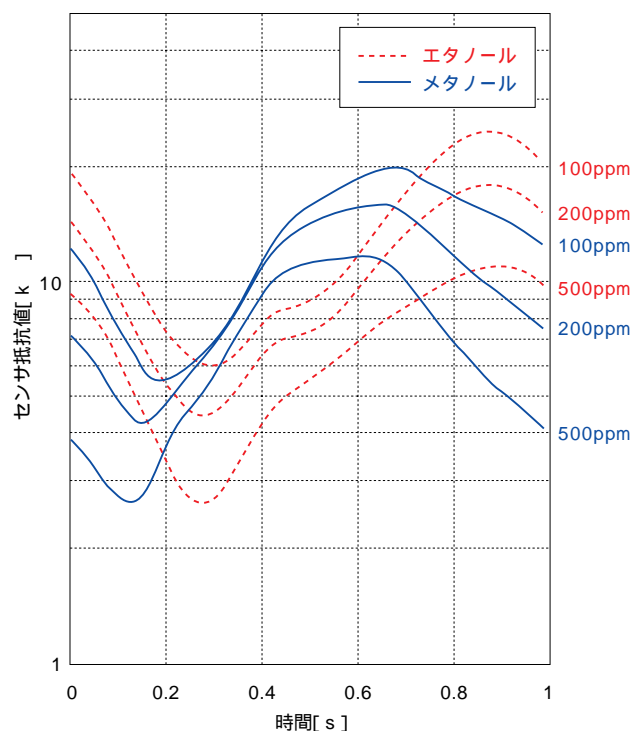



図13　ガス・センサの動的非線形応答の例

ガスの種類によって応答波形が変化する．また，ガスの濃度によって応答のレベルが変わる．

● 動的非線形応答で多種類のガスの識別を行う

半導体ガス・センサは安定で長期間使えるというメリットがあるのですが，デバイスそのものはいろいろなガスに反応してしまうので，ガスの種類を識別できないという問題があります．そこで筆者らは，動的非線形応答を用いることにより，多種類のガスの識別を行うという方法(4)を取っています．これは文献(5)で提案された方法で，対象に対して積極的に働きかけ，その動的な応答からより多くの情報を得ようという，一種のアクティブ・センシングです．

筆者らのガス・センサでは，感ガス部のすぐ下にあるヒータを使って，およそ80℃から320℃まで正弦波状に温度を変化させ（周期1s），このときの抵抗値の動的非線形応答を見ます．周囲にあるガスの種類によって応答の形が，濃度によってレベルが変わります．これらの例を**図13**に示します．波形の違いをコンピュータで処理するためにFFTをかけ，その第1成分の実部と虚部の値を2次元平面上にプロットします．エタノール，メタノール，アセトンについてプロットしたものを**図14**に示します．これにより，多種類のガスの種類の識別と濃度の検出が一つのデバイスで可能となります．実験では，少なくとも8種類のガスが識別できることが分かっています．実際に試してみれば，もっと多くのガスの識別も可能でしょう．

● 短時間でガスを識別する小型モジュールを開発

このガス・センサで尿を検出することを考えます．尿に

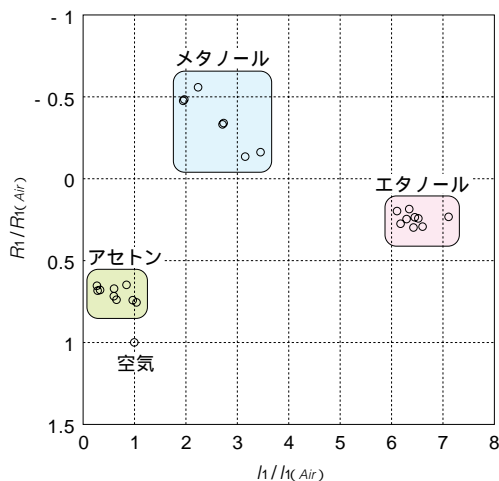



図14　ガスを識別するための2次元プロット

それぞれのガスの波形にFFTをかけたときの第1成分の虚部（実部）を，空気だけのときの波形にFFTをかけたときの第1成分の虚部（実部）で割った値が横軸（縦軸）となっている．

は水を含めて多くの成分が含まれているため，実は上記のように単純に2次元平面状にプロットするだけでは識別が困難です．そこで，尿の蒸気に一定時間さらし，そのとき得られる2次元プロットの時間変化を使います．**図15**に尿と水との比較を示します．これにより，30秒程度で識別が可能となりました．

このように2次元プロットの時間変化を見る場合はもちろん，単一成分ガスの識別でも短時間にサンプリングできることが望ましいです．時間スケールとしては，ガスの分布が変化する速度が考えられます．

筆者らは，1s周期でサンプリング可能な小型のモジュール(**写真9**)を作りました．まず，ガス・センサの感ガス部とヒーターの熱容量が小さいデバイスを選びました．それが前述のきゅう覚センサTGS-2400です．また，これを制御するドライバとして，アイ・ピイ・アイより市販されているデモ用基板「USB245/877」を改変して用いました．これは，センサ信号取得を1チップ・マイコン(Microchip Technology社のPIC16F877)によって行い，USBインターフェースを通してデータをパソコンに転送できるものです．PIC16F877はヒータにかける電圧をPWM(pulse width modulation)で制御し，温度を正弦波状に変化させ，同時にA-Dコンバータで抵抗値を検出し，結果をパソコンに送ります．パソコンでは，転送された信号にFFTをかけ，2次元上にプロットします．RI-MAN内ではこのユニットをUSBを使って認識用のパソコンに接続しています．

6. センサ情報をロボットの動作にどのように生かすのか

ロボットでは，センサ情報を単に取得するだけではなく，どのように動きに反映させるかが大切です．RI-MANでは特に，触覚情報を動きに反映させられることが特色となっています．ここでは，そのためのアルゴリズムについて説明します[(6)]．

人が巧みな物体操作を行っているときには，操作対象のダイナミクスをじょうずに利用しています．ダイナミクスとは，簡単に言えば動きの勢いのことで，ゆっくりとした動作では実現できない操作を，勢いをじょうずに使うことで実現できます．例えば，指を使ったペン回しはダイナミクスを利用した操作で，指が同じ軌道を描いても，動きの速度が違えば操作に失敗します．筆者らは，触覚を使って，ダイナミクスを利用した操作を実現する方法を考えました．

まず，目的とする操作を実現できる軌道とセンサ出力の関係を時系列で得ます．これを基準運動と呼びましょう．例えば，実際のロボットでいろいろ試してみて，たまたまうまくいったときの軌道とセンサ情報を記録することが考えられます．人間も新しいスポーツを習うときに似たようなことをしています．例として，初めてテニスを習う場合を考えると，実際に何回もボールを打ってみてたくさん失

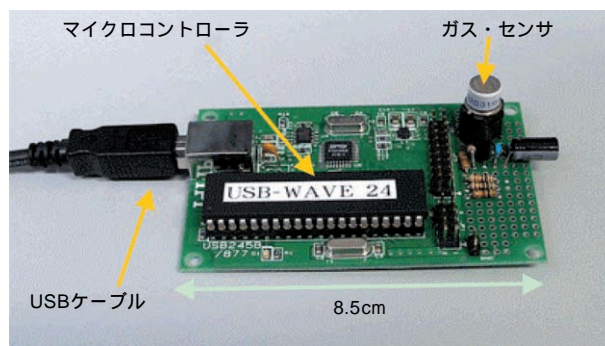



写真9　ガス・センサ・モジュール

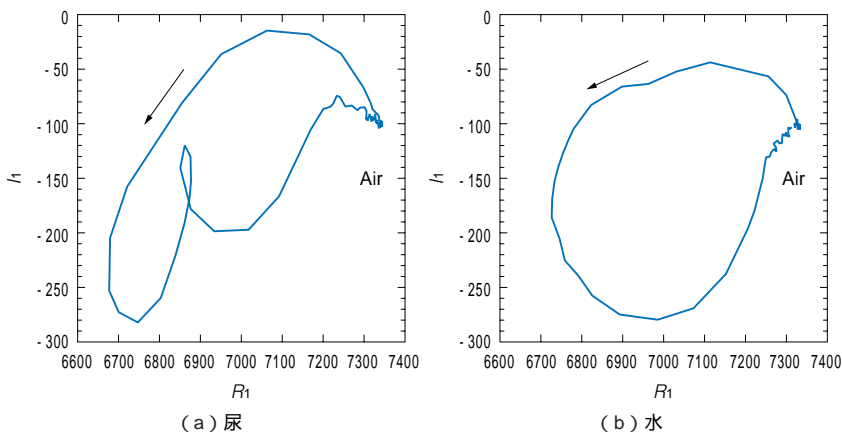
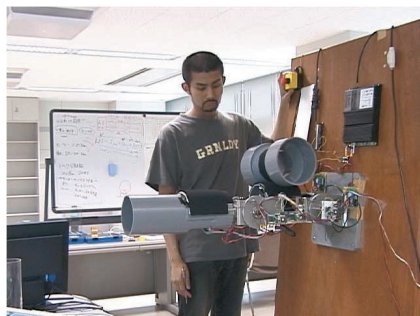
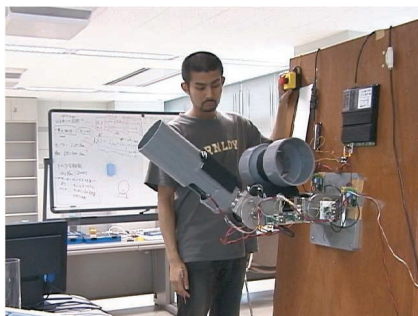
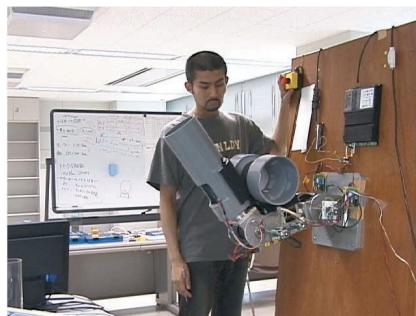
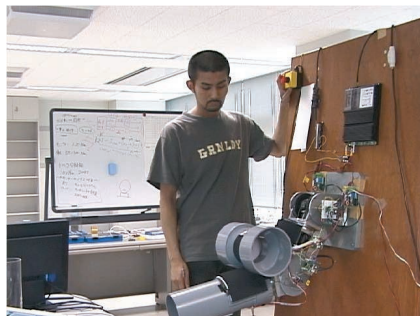
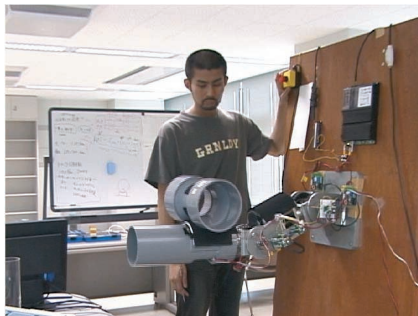



図15
尿と水の2次元プロットの時間変化
2次元プロットの時間変化を見ることにより，尿と水の識別が可能となる．ガスの波形にFFTをかけたときの第1成分の実部が横軸，虚部が縦軸となっている．

(a) 初期状態

(b) 腕たたむ

(c) 前腕が筒に触れる

(d) 筒が移動中

(e) 前腕に移動完了

(f) 腕を伸ばす

写真10　筒状物体を移すダイナミック・マニピュレーション

敗する中から，「たまたまラケットにボールがうまく当たって飛んだときの体の動き」と「打つまでのボールの見え方や手の感覚」を記憶すると思います．このような経験を繰り返し蓄積することで，人間は新しい動きのこつを習得します．上記の方法は，ロボットで同じことを行っていると考えられます．

別の方法としては，センサ情報まで得られる没入型動力学シミュレーション環境中で人がロボットにしてほしい動作を行い，そのときの人の軌道と，シミュレーションで得られるセンサ情報を記録するという手も考えられます．

以上のようにして得た基準運動を使って，その後に行う動きを補正します．具体的な例として，**写真10**に示すようなロボット・アームにより，筒状の物体を上腕から前腕に移動させる操作を考えます．これは，筒状物体の転がり速度に合わせて腕を動かさないといけないので，ダイナミックな操作です．まず，基準運動どおりに動きを開始します．しかし，試行ごとに物体の初期位置やロボットの動きが微妙に異なるため，そのままではダイナミックな操作はうまくいかないことがあります．これを補正するのですが，空間的な関係から，動きの途中で得られた触覚センサ出力によって動きを調節する基準が明らかな部分については，明示的に補正のやり方をプログラミングします．例で言うと，物体がアームから横に滑り落ちそうになっていることが触覚センサの出力から分かったら，腕をねじることでアームの中心に物体が来るように動きを調節します．難しいのは，ある時刻の物体の位置が，同じ時刻の基準運動の物体位置と，腕の軸方向で違う場合です．このときには，どのように軌道を修正したら良いのか直感的には分かりません．そこで，うまくいったときのセンサ情報を使います．つまり，**図16**に示すように基準運動中で現在のセンサ情報に近いものを，現在の時刻に近い中から選び出し，そのときの基準運動の軌道を理想的な軌道として，現在の軌道を修正します．これは，転がりの速さの違いに応じて，軌道も時間的に伸縮させることに相当します．RI-MANでも，このようなアルゴリズムを使って，抱き上げ操作時の動きを補正しています．

＊　＊

ここで示したように，センサ情報を使ってロボットの動きを修正したり，さらには新たな動きを作り出すことによって，ロボットに単に決められた動きの繰り返しではなく，意思や知性があるかのような行動をさせられるようになります．

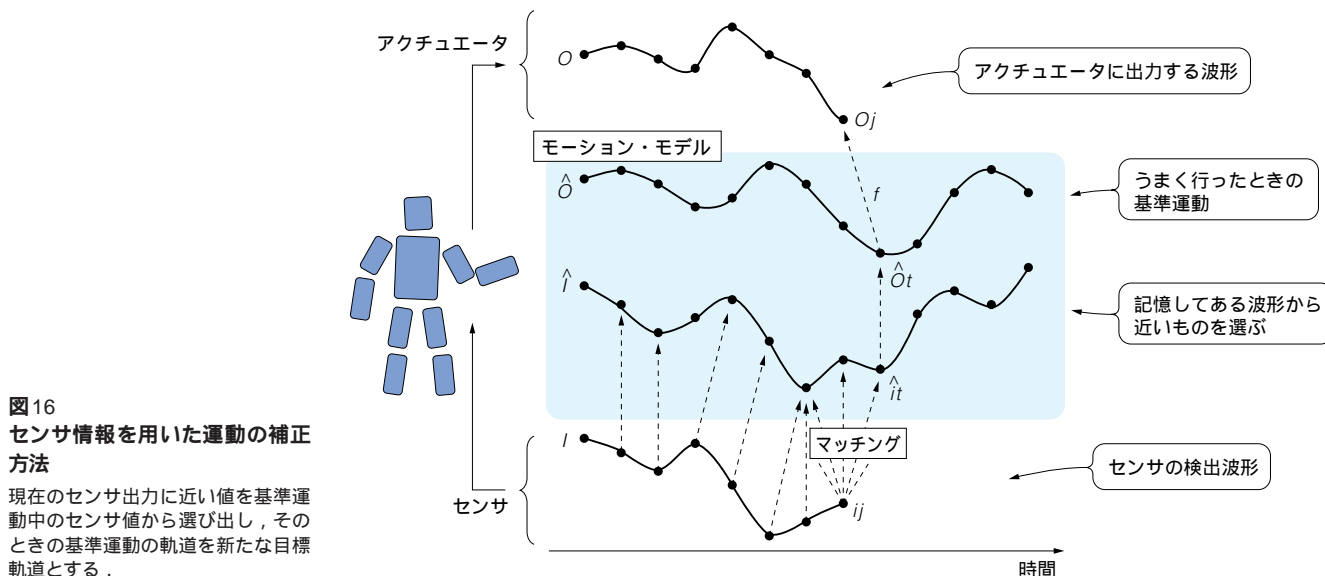



図16
センサ情報を用いた運動の補正方法
現在のセンサ出力に近い値を基準運動中のセンサ値から選び出し，そのときの基準運動の軌道を新たな目標軌道とする．

内部的なルールはそれほど複雑でなくても，センサを使うと想像以上に知的と感じる振る舞いをするようになるものです．これは結局，現実世界の複雑さがセンサを通してロボットの行動に取り込まれているからだと思います．例えば，人型ロボットの視覚に顔を見つける機能を持たせ，人が移動するとロボットも首をねじって人を追いかけるようにするだけでも，ロボットのカメラの奥に何かを感じてしまいます．このように，単なるセンシングと動きの組み合わせ以上の何かを感じさせるところが，ロボットにセンサを搭載することの面白さだと思います．

参考・引用*文献

(1) 中島弘道，大西 昇，向井利春；スペクトルの特徴マップを用いた上下方向音源定位学習システム，電子情報通信学会論文誌，D-II，Vol.J87-D-II，No.11，pp.2034-2044，2004.
(2) 向井利春；2.4.2 ロボットへの装着を目的とした柔軟な面状触覚センサの開発，超五感センサの開発最前線，エヌ・ティー・エス出版，pp.263-271，2005.
(3) 羅 志偉，平野慎也；分散制御システムの開発の事例研究，Design Wave Magazine，2006年4月号，pp.95-114.
(4) Y. Kato and T. Mukai ; A real-time intelligent gas sensor system using a nonlinear dynamic response, Sensors and Actuators B, Vol.120, Issue 2, pp.514-520, 2007.
(5) S. Nakata, H. Nakamura, K. Yoshikawa ; New strategy for development of a gas sensor based on the dynamic characteristics: principle and preliminary experiment, Sensors and Actuators B, 8, pp.187-189, 1992.
(6) 大西正輝，小田島 正，羅 志偉；環境と接するロボットの感覚運動統合による動作模倣，電気学会論文誌C，125-6，pp.856-862，2005.

むかい・としはる
なかしま・ひろみち
かとう・よう
おおにし・まさき
理化学研究所　バイオ・ミメティックコントロール研究センター

<筆者プロフィール>

向井利春．1995年東京大学大学院博士課程修了．同年理化学研究所研究員．2000年から1年間，理研を退職しフランス Laboratoire de Neurobiologie, CNRSにてポスドク．2001年より再び理研に就職．生物型感覚統合センサ研究チームのリーダーとなり，現在に至る．センサ情報処理，ロボティクス，人工筋肉，マンマシンインタフェースなどの研究を行っている．愛知工業大学非常勤講師．博士(工学)．

中島弘道．2001年名古屋大学大学院博士課程修了．同年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターリサーチアソシエイト．2004年同研究センター生物型感覚統合センサー研究チームの研究員となり，現在に至る．ニューラルネットワーク，コンピュータオーディションなどの研究を行っている．博士(工学)．

加藤 陽．1997年名古屋大学大学院博士後期課程修了．同年フィガロ技研株式会社入社.ガス・センサに関する研究開発に従事．2003年より理化学研究所の研究員として，生物型感覚統合センサー研究チームにてセンサ情報処理の研究に従事して現在に至る．ガス・センサが専門だが、最近は触覚センサにも興味を持っている．愛知工業大学非常勤講師．博士(学術)．

大西正輝．2002年大阪府立大学大学院博士課程修了．同年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター環境適応ロボットシステム研究チーム研究員．2006年より産業技術総合研究所情報技術研究部門研究員．現在に至る．理化学研究所客員研究員．ロボットの認識，行動生成などの知識処理に関する研究を行っている．博士(工学)．